

Научная статья

УДК 004.891

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18502>

EDN: <https://elibrary/PTFDWT>



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

Р.Р. Фарахов , Р.А. Бурнашев , О.М. Матренина

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Российская Федерация

 rus-wing-dark@mail.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена вопросам разработки и исследования современной информационной системы, ориентированной на эффективное распознавание и комплексный анализ частиц композиционных материалов. Основой предлагаемого решения являются передовые технологии искусственного интеллекта (ИИ), включающие применение глубоких сверточных нейронных сетей для высокоточной классификации изображений частиц. Интеграция системы осуществляется посредством технологий Интернета вещей, обеспечивающих взаимодействие с современным измерительным оборудованием, используемым в промышленных процессах. Одним из ключевых компонентов разработанной системы выступает модуль экспертной оценки, базирующийся на механизмах нечеткого логического вывода. Этот компонент предназначен для повышения точности анализа в ситуациях неопределенности и недостатка полноты исходных данных. Важную роль играет также созданная база знаний, содержащая производственные правила и специальные функции принадлежности, которые позволяют адекватно обрабатывать описания свойств материалов на уровне лингвистических переменных. Реализация предложенного подхода осуществлена на платформе Python, широко применяемой в области разработки программного обеспечения и обладающей богатыми возможностями благодаря библиотекам для машинного обучения и веб-программирования. Пользовательский интерфейс представлен в виде удобного веб-портала, позволяющего загружать изображения исследуемых образцов, настраивать параметры процесса анализа и получать итоговую информацию в удобной форме, включая графики, таблицы и наглядные визуализации. Практическое внедрение представленной информационной системы существенно сокращает временные затраты на проведение анализа композитных материалов, повышает качество распознавания микроструктурных особенностей и увеличивает общую производительность процессов, характерных для Индустрии 4.0. Особое значение имеет ее вклад в развитие технологий аддитивного производства, позволяя значительно улучшать контроль качества выпускаемых изделий, снижать издержки и повышать эффективность производственных операций. Поэтому данная разработка становится важнейшим элементом интеллектуальной инфраструктуры современного промышленного предприятия, способствующим повышению экономических показателей и конкурентоспособности продукции. Таким образом, исследование демонстрирует перспективность подходов, основанных на синтезе методов ИИ и новых информационных технологий, открывая новые горизонты для автоматизации и оптимизации технологических процессов в промышленности.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, композиционные материалы, нечеткая логика, база знаний, функции принадлежности, экспертные системы, Python, аддитивное производство, искусственный интеллект, Индустрия 4.0

Для цитирования: Фарахов Р.Р., Бурнашев Р.А., Матренина О.М. (2025) Применение технологий искусственного интеллекта для анализа полимерных композиционных материалов в условиях производства. П-Economy, 18 (5), 23–33. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18502>



APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR ANALYSIS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN PRODUCTION CONDITIONS

R.R. Farakhov , **R.A. Burnashev** , **O.M. Matrenina**

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russian Federation

 rus-wing-dark@mail.ru

Abstract. This article addresses the development and research of a modern information system aimed at effective recognition and comprehensive analysis of composite material particles. The proposed solution is based on advanced artificial intelligence (AI) technologies, including the application of deep convolutional neural networks (CNNs) for high-accuracy image classification of particles. System integration is achieved through Internet of Things (IoT) technologies that ensure interaction with modern measurement equipment used in industrial processes. A key component of the developed system is an expert evaluation module based on fuzzy logic inference mechanisms. This component is designed to enhance analysis accuracy in situations characterized by uncertainty or incomplete initial data. A created knowledge base containing production rules and specialized membership functions, also plays a crucial role. It allows for adequate processing of material property descriptions using linguistic variables. The implementation of the proposed approach has been carried out on the Python platform, widely used in software development due to its rich capabilities provided by libraries for machine learning and web programming. The user interface is presented as a convenient web portal, allowing users to upload images of samples under investigation, configure analysis process parameters and obtain final results in a user-friendly format, including graphs, tables and intuitive visualizations. The practical application of this information system significantly reduces time spent on analyzing composite materials, improves microstructural feature recognition quality and increases overall productivity typical of Industry 4.0 processes. It particularly contributes to the development of additive manufacturing technologies by enabling substantial improvement in product quality control, cost reduction and increased efficiency of production operations. Therefore, this development becomes an essential element of intelligent infrastructure for modern industrial enterprises, contributing to improved economic performance and product competitiveness. The study demonstrates the prospects of approaches combining AI methods and new information technologies, opening new horizons for automation and optimization of technological processes in industry.

Keywords: decision support system, composite materials, fuzzy logic, knowledge base, membership functions, expert systems, Python, additive manufacturing, artificial intelligence, Industry 4.0

Citation: Farakhov R.R., Burnashev R.A., Matrenina O.M. (2025) Application of artificial intelligence technologies for analysis of polymer composite materials in production conditions. *П-Economy*, 18 (5), 23–33. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18502>

Введение

Полимерные композиционные материалы играют ключевую роль в современной индустрии благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность, малый вес и долговечность. Их широкое применение охватывает различные отрасли промышленности, включая авиационную, автомобильную и строительную [1–5]. Одним из наиболее перспективных направлений развития технологий изготовления изделий с применением полимерных композитных материалов стало аддитивное производство. Одним из его методов является 3D-печать технологией селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering, SLS) [6–11].

Аддитивные технологии позволяют создавать изделия сложной формы с высоким уровнем точности и гибкости проектирования. Однако эффективное их использование требует глубокого понимания характеристик исходных материалов, особенно качества порошков, используемых

в процессе печати. Качество и однородность порошкового материала оказывают значительное влияние на конечные свойства изготавливаемых деталей, определяя их механическую надежность и срок службы [6–8].

Одним из основных аспектов оценки свойств композиционного порошка является анализ его микроструктуры, включающей размер, форму и распределение отдельных частиц. Этот этап критически важен для контроля качества продукции и оптимизации производственных процессов. Традиционно подобные анализы проводились вручную и непосредственно с участием человека-эксперта, что занимало много времени. Кроме того, в процессе анализа частиц возникали ошибки в измерениях, которые приводили к неправильным результатам.

Современные технологии искусственного интеллекта (ИИ) повышают эффективность в сфере автоматизации и цифровизации процессов анализа, позволяющие существенно повысить производительность в аддитивном производстве.

Целью исследования является разработка интеллектуальной информационной системы, предназначенной для автоматического анализа структуры композиционных материалов и интеграции полученных результатов в систему управления производством на основе технологии ИИ. Данная система базируется на передовых методах машинного обучения и компьютерного зрения, обеспечивая автоматизацию. Разработка подобного программного инструмента соответствует концепции Индустрии 4.0, предусматривающей создание цифровых платформ, которые обеспечивают оптимизацию производственного процесса и повышение конкурентоспособности предприятия [12–16].

Таким образом, наше исследование направлено на разработку инновационной информационно-аналитической системы, способствующей повышению эффективности и надежности производств, применяющих аддитивные технологии. Основные направления работ включают проектирование архитектуры системы, реализацию алгоритмов обработки данных и изображений.

Методология проектирования системы

Формирование UML-диаграммы [17–20] осуществлялось следующими программными модулями:

- 1) интерфейсами ввода/вывода;
- 2) базой знаний (обученной модели);
- 3) базой данных изображений;
- 4) механизмом логического вывода.

В рамках работы была реализована диаграмма, отражающая взаимосвязь между различными программными компонентами системы, включая экспертные системы, нейронные сети и IoT-устройства [21, 22] (рис. 1). Архитектура разрабатываемой системы построена на принципах киберфизических систем, обеспечивающих связь физического пространства и цифровых технологий. Эти принципы позволяют создать замкнутый цикл обработки данных, включающий сбор, анализ, принятие решения и выполнение действий, что характерно для концепции Индустрии 4.0.

Интеграция с оптическими приборами через IoT-технологии

Ключевой задачей являлась интеграция системы с измерительным оборудованием (цифровые микроскопы, стереоскопы) для автоматизации процесса получения и передачи изображений частиц. Для передачи данных были реализованы два протокола, выбранные исходя из специфики решаемых задач: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [23] и HTTP (HyperText Transfer Protocol) [24].

Протокол MQTT был применен для организации взаимодействия между IoT-устройствами и системой в реальном времени по схеме «издатель — подписчик» через брокер Mosquitto.

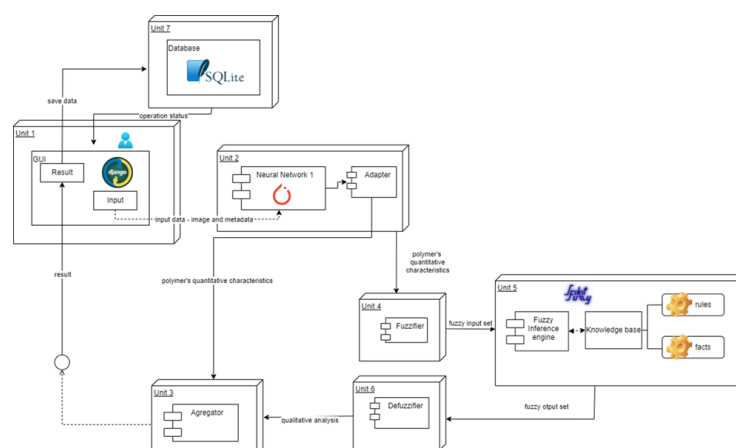


Рис. 1. UML-диаграмма информационной системы

Fig. 1. UML diagram of an information system

Протокол HTTP был использован для передачи больших объемов данных (изображений) по схеме «запрос – ответ» при интеграции с веб-сервисом системы. В нашем случае сервером является информационная система, которая принимает изображения и возвращает результаты анализа.

Интеграция оптических приборов с экспертной системой посредством IoT, создает единую клиент-сервисную сеть для передачи изображений композиционных материалов и их данных. Эта сеть позволяет оперативно получить измерения частиц с удаленных на расстоянии приборов, тем самым оптимизируя процесс аддитивного производства (быстрое принятие решения по использованию композиционных материалов для SLS 3D-печати на основе полученных данных). Клиент-сервисная сеть как часть информационной системы является одним из ключевых элементов интеллектуального производства (Индустрия 4.0), напрямую влияющим на экономические показатели в сфере аддитивного производства.

Обработка и анализ изображений с использованием сверточных нейронных сетей

Для анализа изображений частиц используется сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN) [25–28], которая позволяет проводить спектральный анализ, определять форму частиц и маркировать их на изображениях. Высокая точность распознавания, обеспечиваемая ИИ, критически важна для минимизации технологического брака на последующих этапах аддитивного производства, такого как SLS, где дефекты, а также большие несферические частицы в порошке могут привести к серьезным нарушениям готового изделия.

Алгоритм работы нейронной сети:

1. Разбиение цветной фотографии частиц композиционного порошка на сегменты (сегментирование).
2. Вычисление цветов частиц композиционного порошка.
3. Спектральный и визуальный анализ частиц порошка.
4. Послойное перемещение ядра по сегментам и их вычисление от начала изображения с определенным значением шага.
5. Повторение процесса до тех пор, пока не проходит все изображение.
6. Передача данных, полученных из обработанного цветного изображения.

Таким образом, разработанная система является не просто инструментом анализа, а ключевым элементом инфраструктуры Индустрии 4.0, преобразующим данные в экономические выгоды. Кроме того, снижается количество бракованных изделий, получаемых в результате

использования некачественных композиционных материалов, что позволяет уменьшить издержки предприятий, применяемых аддитивные технологии SLS 3D-печати.

Результаты

Результатом исследовательской работы является прототип информационной системы для распознавания частиц порошков композиционного материала на основе технологий ИИ.

Для включения сети распознавания частиц был написан программный модуль. На входе ожидается изображение, а на выходе ожидается объект DataFrame [29, 30], который содержит характеристики каждой частицы из изображения.

В рамках разработки экспертной системы для оценки качества сыпучих материалов, используемых в аддитивных технологиях, был реализован комплексный подход, основанный на методах нечеткой логики. Процесс работы системы можно разделить на несколько ключевых этапов.

Формирование лингвистических переменных

Для работы экспертной системы были определены три ключевые входные лингвистические переменные (**Форма**, **Гладкость поверхности**, **Температура спекания**), каждая из которых описывается набором термов (качественных характеристик) и соответствующими им функциями принадлежности.

1. **Форма (сферичность)**. Данный параметр является числовой мерой, вычисляемой как модуль разницы между единицей и отношением площади распознанной частицы к площади аппроксимированного вокруг нее круга или квадрата ($|1 - S/S_p|$). Чем ближе полученное значение к нулю, тем более сферичной считается частица. Типы формы:

- «Не сферическая» — значение превышает порог ε_1 ($|x| > \varepsilon_2$).
- «Менее сферическая» — значение находится в интервале между порогами ε_1 и ε_2 ($\varepsilon_1 \leq |x| \leq \varepsilon_2$).
- «Сферическая» — значение меньше порога ε_1 ($|x| < \varepsilon_1$).

Для описания принадлежности к этим термам используется двойная треугольная функция в диапазоне от -1 до 1 .

2. **Гладкость поверхности (Отношение шума изображения)**. Этот параметр рассчитывается техническими средствами как отношение уровня шума изображения, где средняя яркость шума в частицах принимает значения в интервале от 0 до 1 . Типы гладкости поверхности:

- «Не гладкая» — значение превышает порог ε_1 ($x > \varepsilon_1$).
- «Менее гладкая» — значение находится между порогами ε_1 и ε_2 ($\varepsilon_1 \leq x \leq \varepsilon_2$).
- «Гладкая» — значение меньше порога ε_1 ($x < \varepsilon_1$).

Для моделирования этого параметра применяется трапецевидная функция принадлежности в диапазоне от 0 до 1 .

3. **Температура спекания [°C]**. Значение этого параметра задается пользователем системы вручную. Типы температуры спекания:

- «Низкая» — значение ниже 150°C ($x < 150$).
- «Допустимая (Средняя)» — значение лежит в диапазоне от 150°C до 180°C ($150 \leq x \leq 180$).
- «Высокая» — значение превышает 180°C ($x > 180$).

Для данной переменной также используется трапецевидная функция принадлежности, определенная в интервале от 120°C до 210°C .

Процесс оценки качества материала в экспертной системе представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов: от формализации входных параметров через лингвистические переменные до формирования итогового решения на основе суммы взвешенных правил. Данный подход, основанный на теории нечеткой логики, позволяет обрабатывать качественные и неточные данные, имитируя рассуждения эксперта-технолога. Результатом работы системы является категориальная оценка «Низкое», «Среднее» или «Высокое качество», что позволяет оперативно принимать решение о пригодности материала для аддитивного производства.

Рис. 2. Окно с введенными данными для распознавания частиц на фотографии
Fig. 2. Window with entered data for recognizing particles in a photograph

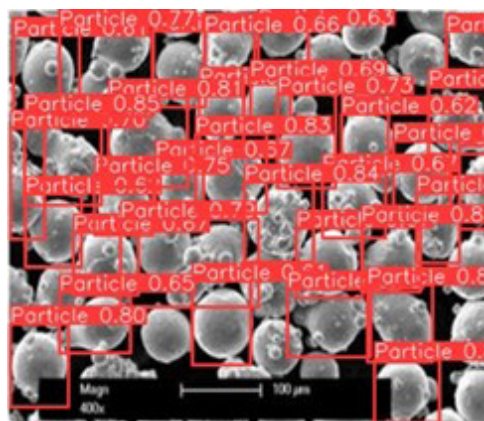
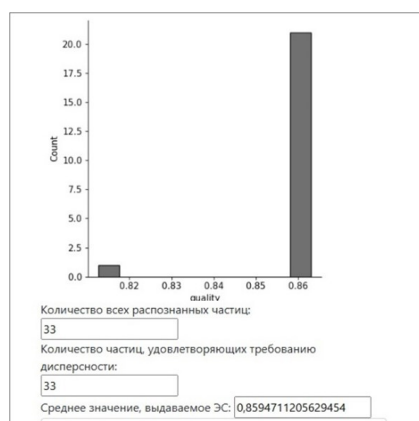


Рис. 3. Вывод результата решения задач на идентификацию частиц порошка композиционного материала
Fig. 3. Output of the result of solving problems on identification of particles of composite material powder

Аутентификация

Для аутентификации пользователя и возможности предоставления сохраненных им результатов расчетов было решено использовать протокол OAuth2 [31].

После входа в приложение пользователь попадает на главную страницу, где может ввести данные и получить результат (рис. 2, 3).

Перспективы развития системы

Разработанная информационная система для распознавания и анализа частиц полимерных композиционных материалов требует дальнейшего развития в нескольких направлениях для повышения эффективности и расширения возможностей:

1. Внедрение более сложных моделей машинного обучения, таких как глубокие нейронные сети (Deep Learning), что может повысить точность распознавания частиц и их характеристик. Также можно рассмотреть использование генеративно-сопоставительных сетей (Generative Adversarial Network, GAN) для улучшения качества изображений перед анализом.

2. Внедрение поддержки дополнительных IoT-устройств, таких как датчики температуры и влажности, что позволит учитывать внешние факторы, влияющие на свойства композиционных материалов, и повысить точность анализа.

3. Создание мобильного приложения для управления системой и просмотра результатов анализа в реальном времени, что сделает ее более удобной для пользователей и позволит проводить исследования в полевых условиях.

4. На основе накопленных данных о качестве сырья и параметрах печати построение модели, прогнозирующей конечные свойства изделия еще на этапе контроля входных материалов, что позволит оптимизировать режимы печати и минимизировать риски.

5. Автоматическая запись результатов анализа в распределенный реестр (блокчейн), что создаст неизменяемую историю и гарантию качества для конечных потребителей, особенно в регулируемых отраслях, таких как аэрокосмическая и медицинская.

Заключение

Разработанная информационная система представляет собой не просто инструмент для анализа композиционных материалов, а критически важный элемент киберфизической системы современного интеллектуального предприятия. Использование современных технологий, таких как CNN и IoT, позволяет значительно повысить точность и эффективность анализа. Непосредственное воздействие системы на экономические показатели выражается в снижении издержек, минимизации брака и повышении общей эффективности производственного процесса. Система может быть использована в различных отраслях промышленности, где требуется анализ структуры материалов, особенно в высокотехнологичном аддитивном производстве, и имеет большой потенциал для дальнейшего развития в соответствии с трендами Индустрии 4.0.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сотов А.В., Зайцев А.И., Абдрахманова А.Э., Попович А.А. (2024) Аддитивное производство непрерывно армированных полимерных композитов с использованием промышленных роботов: Обзор. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 18 (1), 20–30. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-20-30>
2. Li J.H., Huang X.D., Durandet Y., Ruan D. (2021) A review of the mechanical properties of additively manufactured fiber reinforced composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067 (1), art. no. 012105. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1067/1/012105>
3. Mazeeva A., Masaylo D., Razumov N., Konov G., Popovich A. (2023) 3D Printing Technologies for Fabrication of Magnetic Materials Based on Metal–Polymer Composites: A Review. *Materials*, 16 (21), art. no. 6928. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16216928>
4. Chen Y., Zhang J., Li Z., Zhang H., Chen J., Yang W., Yu T., Liu W., Li Y. (2023) Manufacturing Technology of Lightweight Fiber-Reinforced Composite Structures in Aerospace: Current Situation and toward Intellectualization. *Aerospace*, 10 (3), art. no. 206. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10030206>
5. Salifu S., Desai D., Ogunbiyi O., Mwale K. (2022) Recent development in the additive manufacturing of polymer-based composites for automotive structures – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119 (11–12), 6877–6891. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08569-z>
6. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. (2021) Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов. *Региональная архитектура и строительство*, 1 (46), 41–45.
7. Данилов А.М., Гарькина И.А. (2011) Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения. *Известия высших учебных заведений. Строительство*, 1 (625), 80–85.

8. Гарькина И.А., Данилов А.М. (2020) Методы системного анализа в проектировании композитов. *Региональная архитектура и строительство*, 1 (42), 63–68.
9. Фарахов Р.Р., Бурнашев Р.А., Насибуллин И.А., Еникеев А.И., Болсуновская М.В. (2024) Разработка образовательной интеллектуальной системы анализа полимерных материалов в аддитивном производстве. *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*, 1 (62), 76–89. DOI: <https://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2024-1-76-89>
10. Burnashev R., Enikeeva A., Amer I.F., Akhmedova A., Bolsunovskaya M., Enikeev A. (2023) Building a Fuzzy Expert System for Assessing the Severity of Pneumonia. In: *Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2022* (ed. K. Arai), 544, 380–396. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16075-2_27
11. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. (2021) *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
12. Ghobakhloo M. (2020) Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, art. no. 119869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
13. Sony M., Naik S. (2020) Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*, 27 (7), 2213–2232. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>
14. Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G., Feld T., Hoffmann M. (2014) Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6 (4), 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
15. Андиева Е.Ю., Фильчакова В.Д. (2016) Цифровая экономика будущего, индустрия 4.0. *Прикладная математика и фундаментальная информатика*, 3, 214–218.
16. Гинзбург А.В., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О. (2021) Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор. *Вестник МГСУ*, 16 (7), 885–911. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.7.885-911>
17. Houndji V.R., Akotenou G. (2023) UMLDesigner: An Automatic UML Diagram Design Tool. In: *Deep Learning Theory and Applications. DeLTA 2023* (eds. D. Conte, A. Fred, O. Gusikhin, C. Sansone), Cham: Springer, 340–350. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39059-3_23
18. Suriya S., Nivetha S. (2022) Design of UML Diagrams for WEBMED – Healthcare Service System Services. *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*, 8 (1), art. no. e5. DOI: <https://doi.org/10.4108/eetel.v8i1.3015>
19. Zou Y., Wang J., Tian X., Li N., Gong G. (2023) Intelligent generation of combat simulation scenarios based on UML diagram recognition. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 14 (3), art. no. 2350043. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793962323500435>
20. Chen F., Zhang L., Lian X., Niu N. (2022) Automatically recognizing the semantic elements from UML class diagram images. *Journal of Systems and Software*, 193, art. no. 111431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111431>
21. Chigilipalli B.K., Karri T., Chetti S.N., Bhiogade G., Kottala R.K., Cheepu M. (2023) A Review on Recent Trends and Applications of IoT in Additive Manufacturing. *Applied System Innovation*, 6 (2), art. no. 50. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi6020050>
22. Haghnegahdar L., Joshi S.S., Dahotre N.B. (2022) From IoT-based cloud manufacturing approach to intelligent additive manufacturing: Industrial Internet of Things – an overview. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119 (3), 1461–1478. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08436-x>
23. Lakshminarayana S., Praseed A., Thilagam P.S. (2024) Securing the IoT application layer from an MQTT protocol perspective: Challenges and research prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26 (4), 2510–2546. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3372630>
24. Tedyyana A., Ghazali O., Purbo O.W. (2023) A real-time hypertext transfer protocol intrusion detection system on web server. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21 (3), 566–573. DOI: <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v21i3.24938>
25. Багаев И.И. (2020) Анализ понятий нейронная сеть и сверточная нейронная сеть, обучение сверточной нейросети при помощи модуля TensorFlow. *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*, 8 (1), 15–22. DOI: <https://doi.org/10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22>
26. Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Devenci M., Parmar M. (2024) A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 57 (4), art. no. 99. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>



27. Krichen M. (2023) Convolutional Neural Networks: A Survey. *Computers*, 12 (8), art. no. 151. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers12080151>
28. Mahamudul Hashan A., Md Rakib Ul Islam R., Avinash K. (2022) Apple Leaf Disease Classification Using Image Dataset: a Multilayer Convolutional Neural Network Approach. *Informatics and Automation*, 21 (4), 710–728. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.21.4.3>
29. Gupta P., Bagchi A. (2024) Introduction to Pandas. In: *Essentials of Python for Artificial Intelligence and Machine Learning. Synthesis Lectures on Engineering, Science, and Technology*, Cham: Springer, 161–196. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43725-0_5
30. Candra A.P. (2025) Analisis Data Menggunakan Python: Memperkenalkan Pandas dan NumPy. *Journal of Information System and Education Development*, 3 (1), 11–16. DOI: <https://doi.org/10.62386/jised.v3i1.118>
31. Chatterjee A., Gerdes M.W., Khatriwada P., Prinz A. (2022) SFTSDH: Applying Spring Security Framework with TSD-Based OAuth2 to Protect Microservice Architecture APIs. *IEEE Access*, 10, 41914–41934. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165548>

REFERENCES

1. Sotov A.V., Zaytsev A.I., Abdrahmanova A.E., Popovich A.A. (2024) Additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer composites using industrial robots: A review. *Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya)*, 18 (1), 20–30. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-20-30>
2. Li J.H., Huang X.D., Durandet Y., Ruan D. (2021) A review of the mechanical properties of additively manufactured fiber reinforced composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067 (1), art. no. 012105. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1067/1/012105>
3. Mazeeva A., Masaylo D., Razumov N., Konov G., Popovich A. (2023) 3D Printing Technologies for Fabrication of Magnetic Materials Based on Metal–Polymer Composites: A Review. *Materials*, 16 (21), art. no. 6928. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16216928>
4. Chen Y., Zhang J., Li Z., Zhang H., Chen J., Yang W., Yu T., Liu W., Li Y. (2023) Manufacturing Technology of Lightweight Fiber-Reinforced Composite Structures in Aerospace: Current Situation and toward Intellectualization. *Aerospace*, 10 (3), art. no. 206. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10030206>
5. Salifu S., Desai D., Ogunbiyi O., Mwale K. (2022) Recent development in the additive manufacturing of polymer-based composites for automotive structures – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119 (11–12), 6877–6891. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08569-z>
6. Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. (2021) Conceptual approaches to system design of composite materials. *Regional architecture and engineering*, 1 (46), 41–45.
7. Danilov A.M., Gar'kina I.A. (2011) Metodologiya proektirovaniia slozhnykh sistem pri razrabotke materialov spetsial'nogo naznacheniia [Methodology for designing complex systems in the development of special-purpose materials]. *News of higher educational institutions. Construction*, 1 (625), 80–85.
8. Garkina I.A., Danilov A.M. (2020) System analysis methods in design of composites. *Regional architecture and engineering*, 1 (42), 63–68.
9. Farahov R.R., Burnashev R.A., Nasybullin I.A., Enikeev A.I., Bolsunovskaya M.V. (2024) Development of an educational intelligent system for analysis of polymer materials in additive manufacturing. *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 1 (62), 76–89. DOI: <https://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2024-1-76-89>
10. Burnashev R., Enikeeva A., Amer I.F., Akhmedova A., Bolsunovskaya M., Enikeev A. (2023) Building a Fuzzy Expert System for Assessing the Severity of Pneumonia. In: *Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2022* (ed. K. Arai), 544, 380–396. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16075-2_27
11. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. (2021) *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>

12. Ghobakhloo M. (2020) Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, art. no. 119869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
13. Sony M., Naik S. (2020) Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. Benchmarking: *An International Journal*, 27 (7), 2213–2232. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>
14. Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G., Feld T., Hoffmann M. (2014) Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6 (4), 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
15. Andieva E.Y., Filchakova V.D. (2016) Ihe digital economy of the future, Industry 4.0. *Prikladnaia matematika i fundamental'naia informatika [Applied Mathematics and Fundamental Computer Science]*, 3, 214–218.
16. Ginzburg A.V., Adamtsevich L.A., Adamtsevich A.O. (2021) Construction industry and the Industry 4.0 concept: a review. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 16 (7), 885–911. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.7.885-911>
17. Houndji V.R., Akotenou G. (2023) UMLDesigner: An Automatic UML Diagram Design Tool. In: *Deep Learning Theory and Applications. DeLTA 2023* (eds. D. Conte, A. Fred, O. Gusikhin, C. Sansone), Cham: Springer, 340–350. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39059-3_23
18. Suriya S., Nivetha S. (2022) Design of UML Diagrams for WEBMED – Healthcare Service System Services. *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*, 8 (1), art. no. e5. DOI: <https://doi.org/10.4108/eetel.v8i1.3015>
19. Zou Y., Wang J., Tian X., Li N., Gong G. (2023) Intelligent generation of combat simulation scenarios based on UML diagram recognition. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 14 (3), art. no. 2350043. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793962323500435>
20. Chen F., Zhang L., Lian X., Niu N. (2022) Automatically recognizing the semantic elements from UML class diagram images. *Journal of Systems and Software*, 193, art. no. 111431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111431>
21. Chigilipalli B.K., Karri T., Chetti S.N., Bhiogade G., Kottala R.K., Cheepu M. (2023) A Review on Recent Trends and Applications of IoT in Additive Manufacturing. *Applied System Innovation*, 6 (2), art. no. 50. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi6020050>
22. Haghnegahdar L., Joshi S.S., Dahotre N.B. (2022) From IoT-based cloud manufacturing approach to intelligent additive manufacturing: Industrial Internet of Things – an overview. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119 (3), 1461–1478. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08436-x>
23. Lakshminarayana S., Praseed A., Thilagam P.S. (2024) Securing the IoT application layer from an MQTT protocol perspective: Challenges and research prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26 (4), 2510–2546. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3372630>
24. Tedyyana A., Ghazali O., Purbo O.W. (2023) A real-time hypertext transfer protocol intrusion detection system on web server. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21 (3), 566–573. DOI: <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v21i3.24938>
25. Bagaev I.I. (2020) Concept analysis neural network and conventional neural network, conventional neural network training using the TensorFlow module. *Software of systems in the industrial and social fields*, 8 (1), 15–22. DOI: <https://doi.org/10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22>
26. Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Deveci M., Parmar M. (2024) A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 57 (4), art. no. 99. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>
27. Krichen M. (2023) Convolutional Neural Networks: A Survey. *Computers*, 12 (8), art. no. 151. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers12080151>
28. Mahamudul Hashan A., Md Rakib Ul Islam R., Avinash K. (2022) Apple Leaf Disease Classification Using Image Dataset: a Multilayer Convolutional Neural Network Approach. *Informatics and Automation*, 21 (4), 710–728. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.21.4.3>
29. Gupta P., Bagchi A. (2024) Introduction to Pandas. In: *Essentials of Python for Artificial Intelligence and Machine Learning. Synthesis Lectures on Engineering, Science, and Technology*, Cham: Springer, 161–196. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43725-0_5
30. Candra A.P. (2025) Analisis Data Menggunakan Python: Memperkenalkan Pandas dan NumPy. *Journal of Information System and Education Development*, 3 (1), 11–16. DOI: <https://doi.org/10.62386/jised.v3i1.118>

31. Chatterjee A., Gerdes M.W., Khatiwada P., Prinz A. (2022) SFTSDH: Applying Spring Security Framework with TSD-Based OAuth2 to Protect Microservice Architecture APIs. *IEEE Access*, 10, 41914–41934. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165548>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

ФАРАХОВ Рустам Ринатович

E-mail: rus-wing-dark@mail.ru

Rustam R. FARANOV

E-mail: rus-wing-dark@mail.ru

БУРНАШЕВ Рустам Арифович

E-mail: r.burnashev@inbox.ru

Rustam A. BURNASHEV

E-mail: r.burnashev@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1057-0328>

МАТРЕНИНА Ольга Михайловна

E-mail: OMMatrenina@kpfu.ru

Olga M. MATRENINA

E-mail: OMMatrenina@kpfu.ru

Поступила: 08.09.2025; Одобрена: 28.10.2025; Принята: 28.10.2025.

Submitted: 08.09.2025; Approved: 28.10.2025; Accepted: 28.10.2025.